第39卷 第5期
2022年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

草甸草原动态融雪过程与气象要素关系分析
——以额尔古纳市为例

桑 婧[1]， 王迎宾[2]， 钱连红[1]， 王海梅[1]， 王淇玉[3]

（1. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051；2. 辽宁农业职业技术学院，辽宁 营口 115009；3. 成都信息工程大学，四川 成都 610225）

摘 要：利用DSJ1型超声波雪深观测仪和同期气象观测数据，对2021年2—3月间发生在额尔古纳的1次融雪过程进行分析。结果表明：(1) 额尔古纳融雪速度呈现先慢后快的特点，缓慢融雪期融雪速率约为0.37 cm·d^{-1}，快速融雪期融雪速率可达4.75 cm·d^{-1}，每日的2:00—19:00是雪深下降的主要时段；(2) 气温与雪深之间存在线性相关关系，气温每升高1 ℃，积雪深度下降0.439 cm；当积雪深度在10 cm以上时，对雪深影响较为明显的气温区间为−11~5 ℃，且气温在0 ℃以上时，雪深与气温拟合趋势的斜率较大；(3) 主要融雪期和快速融雪期气温的滞后效应不同，在融雪期内，雪深与超前3 h气温的相关关系最为显著，其次是当前气温；在快速融雪期，雪深的变化幅度主要取决于超前1 h的气温，其次是超前2 h气温；风速与雪深的相关系数最小，且不存在滞后性；(4) 多气象因子综合作用是融雪期雪深变化的重要原因，但5 cm地温是影响雪深变化的主导因子。

关键词：草甸草原；动态融雪；气象因素

IPCC第六次评估报告[1]中明确指出，未来20 a预计全球将升温达到或超过1.5 ℃，人类正在经历的气候变化都将随着升温而加剧。积雪作为冰冻圈的研究对象之一，对气候变化的响应十分敏感。积雪不仅对土壤具有保温蓄水和维持墒情的作用[2]，还影响大气与陆面之间的水分交换，对全球气候变化也有着深远的影响。季节性积雪的组合性变化[1]，可直接影响到水资源状况，而积雪消融的快慢也与融雪性洪水、雪崩等灾害有直接联系[3-4]。因此，融雪过程的研究不仅具有提高全球气候变化认识的科学意义，也具有灾害防御的现实应用价值。

北半球的亚欧大陆是主要的积雪区[5-6]，塔里木盆地以北、青藏高原、内蒙古高原、兴安岭和东北平原等地是我国主要的积雪区域[7-8]。而作为稳定季节积雪区的内蒙古东部地区[9-10]，呼伦贝尔地区年均积雪深度可达4.38 cm[11]，是研究融雪过程的最佳区域。基于2000—2017年MOD10A1积雪产品的研究表明[12]，蒙古高原积雪覆盖率和积雪日数变化存在减少的趋势，但阿尔泰山、杭爱山、呼伦贝尔东部、锡林郭勒北侧和大兴安岭西侧部分地区增长趋势较显著。针对积雪覆盖与气象因子关系的研究[13]，揭示了内蒙古地区春季、冬季积雪覆盖率均与冬季降水量呈显著正相关，各季节积雪覆盖率与温度呈负相关关系；但完全面向融雪过程的研究仍显不足。

融雪过程会受到单一或多种气象因素的影响，考虑辐射、潜热、感热等能量之间的平衡，可以建立常规气象观测资料，预测雪面温度和积雪深度变化的融雪模型[14]；气温的升高和增温区内局部空气热对流可以加速积雪的消融[15]；沙尘沉降对积雪消融也有明显的影响，影响效果可以得到量化[16]。利用遥感技术可以得到塔什库尔干河流域积雪与气象因子的相关度排序为：平均气温>太阳辐射>降水>风速>相对湿度[17]。以上研究为认识积雪变化与气候、气象的关系提供了很好的借鉴。由于分钟等级高多时间频次的观测分析不足，限制了目前对融雪动态影响机制的精细化描述；且国内对于融雪

收稿日期：2022-03-15； **修订日期：**2022-06-21
基金项目：内蒙古科技厅关键技术项目“基于融雪动态的内蒙古牧区雪灾时空滚动预警技术”(2021GG0019)；西藏科技厅项目(XZ202102YD0012C)
作者简介：桑婧(1992-)，女，工程师，硕士，主要从事应用气象方面的研究. E-mail: 353647938@qq.com
通讯作者：王海梅. E-mail: wanghmhuhe@126.com

过程的研究主要集中在青藏高原和新疆地区,而对于内蒙古东部的相关研究鲜见报道。

本文利用架设在自动气象站内的超声波雪深自动观测仪器,对积雪消融过程展开持续动态监测,结合同期气象观测数据,探究融雪过程与多种气象因子的相关关系,为开展内蒙古东部积雪动态变化的研究提供支持。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

额尔古纳地处大兴安岭西北麓,呼伦贝尔草原北部,是中国最北端的边境城市之一。额尔古纳南北跨度较大,北部属寒温带大陆性季风气候,南部属中温带大陆性季风气候。气候特点为昼夜温差大,夏季短促,冬季寒冷漫长;年平均气温在0 ℃以下,无霜期仅为70~98 d。

1.2　数据选取

1.2.1　雪深数据　以额尔古纳国家级基本气象站数据为依据,气象站地理位置为120°12′30″E,50°15′N,下垫面代表植被类型以草甸草原为主,气象站地域开阔,具有较好的区域代表性。雪深数据来自站内架设的DSJ1型自动超声波雪深观测仪,该仪器通过测量超声波脉冲发射和返回的时间,测算从传感器探头到目标的距离,实现雪深变化的同时间同频次观测。DSJ1型超声波雪深观测仪具有抵抗恶劣环境、防沙、免维护等特点,适用于长期连续测量积雪深度、时段降雪量等;该仪器的雪深量程为0~2000 mm,精度为10 mm,分辨率为0.25 mm(有温度补偿时),设定观测频率为1 h,每日可获得24个时次的数据。

1.2.2　气象数据　于2020年10月31日—2021年3月14日,观测站点收集积雪同步的逐小时气温、0 cm地温、5 cm地温、雪面温度和风速气象要素数据,进行雪深与气象关系分析。由于各气象要素布设于同一站点,相互间隔小于5 m,因此可视为同步观测数据。

1.3　研究方法

采用气象要素与雪深的超前滞后相关分析,进行二者间影响与响应关系分析。基于Pearson线性相关系数,进行相关关系及其显著性检验分析。

2　结果与分析

2.1　融雪规律

2.1.1　2020—2021年额尔古纳融雪过程　2020—2021年冬季,观测到1次持续时间135 d的积雪过程,积雪出现于2020年10月31日2:00,至2021年3月14日8:00全部融化,以本次长时间积雪过程为研究对象。

从图1可知,2020年10月31日开始,额尔古纳出现了3次明显的降雪过程,分别为2020年10月31日、11月6日和2021年2月18日。第1次降雪之后,积雪有短暂消融;第2次降雪直到2021年2月上旬都没有明显消融,积雪期间出现多次小量的降雪过程;第3次降雪主要时段是2月18日18:00—2月19日21:00,雪深从15 cm增至27 cm;2月20日20:00以后,随着气温的回升,雪深出现明显下降,3月10

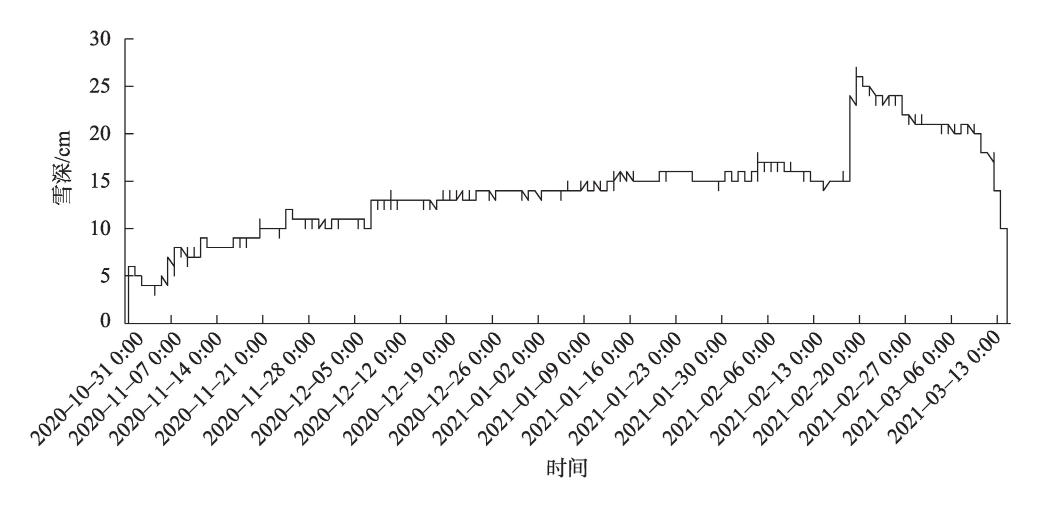


图1　2020年10月31日—2021年3月14日额尔古纳站逐小时积雪深度

Fig. 1　Hourly snow depth observation sequence at Ergun Station from October 31, 2020 to March 14, 2021

日4:00开始雪深下降至20 cm以下,3月12日开始雪深下降明显加快,12日、13日和14日雪深分别减少了4 cm、4 cm和10 cm,融雪时段持续到3月14日8:00,积雪完全消融。

由此可见,2021年春季额尔古纳主要融雪时段为2月20日—3月14日(下同),持续时间为22 d(图2),在主要融雪时段中3月10—14日为2021年春季额尔古纳快速融雪时段,持续时间为5 d(图3)。

在主要融雪时段内,额尔古纳气温呈波动变化,2月20—23日,气温出现明显的下降,随后波动较大;3月6日气温明显上升,雪深却在3月8日开始下降,融雪没有立刻对气温的升高产生响应。5 cm地温、雪面温度和地面温度数值和雪深变化趋势较为相近,呈现3月11日前小幅波动,3月11后有明显的上升(图2)。

在快速融雪时段内,3月10日0:00—8:00雪深缓慢下降,8:00之后雪深有波动变化,3月11日雪深维持在18 cm左右,3月12日0:00—8:00雪深下降较为明显;3月13日0:00—14:00波动下降,之后维持;3月14日0:00—8:00雪深极速下降至完全消融(图3)。

2.1.2 融雪日变化过程 由图4可见,主要融雪时段内,雪深变化总体呈现降-平缓波动下降的趋势,在2:00—8:00雪深显著下降,8:00—19:00雪深略呈下降趋势,19:00—23:00变化平缓。雪深峰值出现在1:00—2:00,约20.87 cm;谷值在16:00出现,约19.83 cm。气温呈现先升后降的变化趋势,最高气温出现在8:00,为-8.63 ℃。5 cm地温、雪面温度和地面温度总体变化不大,呈单峰趋势,地面温度峰值在8:00,5 cm地温的峰值在16:00,雪面温度的峰值出现在12:00。

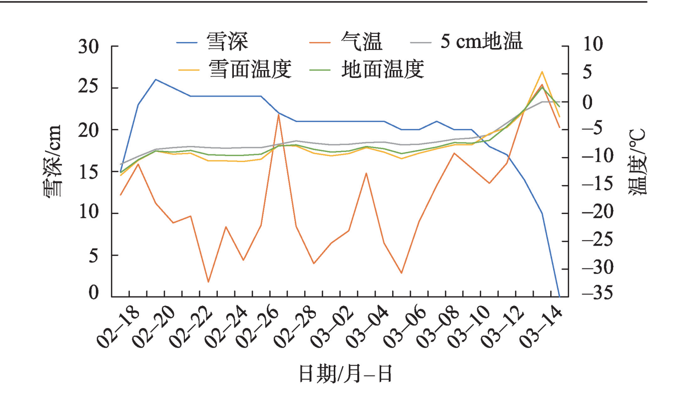


图2 2021年春季额尔古纳站主要融雪时段每日0:00积雪深度和地面温度、气温、5 cm地温、雪面温度

Fig. 2 Observation sequence of snow depth and ground temperature, air temperature, 5 cm ground temperature, and snow surface temperature during the main snowmelt period at Erguna Station in the spring of 2021

图5为2:00—19:00(图4中雪深下降时段),订正后的雪深变化量(即后一时雪深减去前一时雪深得到的逐小时雪深变化量)与气温等气象因素的变化特征。2:00—7:00随着气温等因素上升,雪深变化量呈减少趋势;8:00—12:00雪深变化量随气温等因素下降而增加;13:00—19:00雪深变化量减少,气

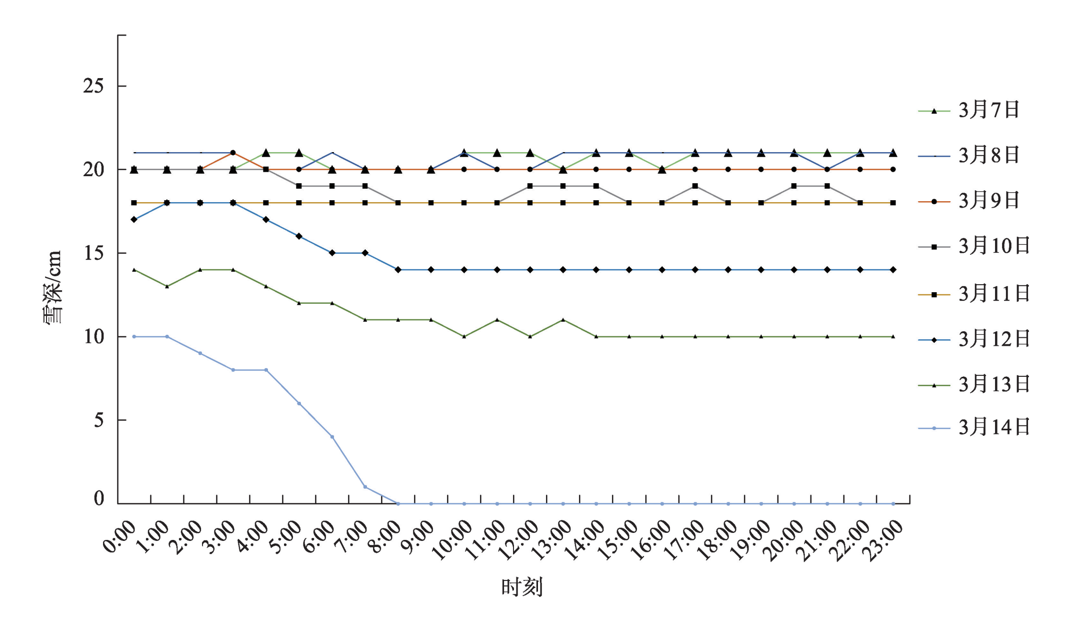


图3 2021年3月7—14日额尔古纳站逐日雪深变化

Fig. 3 From March 7th to March 14th, 2021, the snow depth changes at Erguna Station day by day

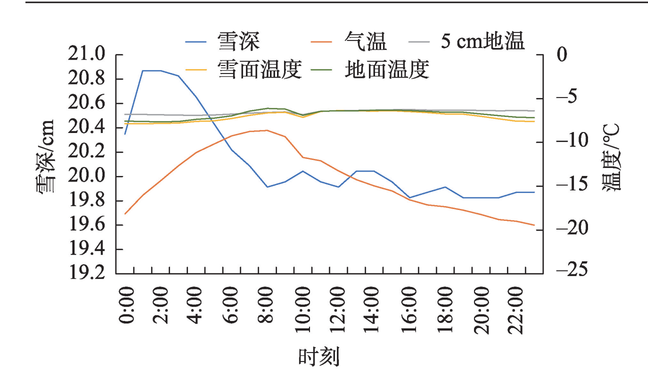


图4　额尔古纳站主要融雪期多日平均逐小时雪深与同步气象要素日变化

Fig. 4　Hourly average snow depth and average multi-day variation of meteorological factors during the main snowmelt period at Erguna Station

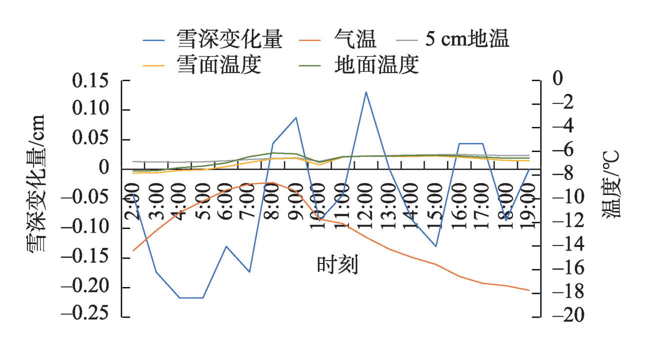


图5　额尔古纳站融雪期2:00—19:00逐小时雪深变化与气象因素变化

Fig. 5　Hourly snow depth changes and changes in meteorological factors during the snowmelt period at Erguna Station from 2 to 19 o'clock every day

温等温度因素下降。最大融雪深度为0.217 cm,出现在4:00—5:00和5:00—6:00,其次是0.174 cm,出现在3:00—4:00和7:00—8:00。

综合融雪期雪深与气温等其他气象因素的日变化分析,在主要融雪期,日最高气温为-8.63 ℃,最低气温为-19.44 ℃,且5 cm地温、雪面温度和地面温度均低于0 ℃,这说明即使温度在0 ℃以下,积雪仍能消融。在雪深减少较快的2:00—8:00,也是气温快速升高的时段,而后9:00—11:00气温下降,但雪深却出现阶段性峰谷值。11:00—23:00气温缓慢下降,雪深没有明显的升降趋势。说明积雪融化对温度的响应存在超前或滞后效应。

2.2　融雪与气象要素相关分析

2.2.1　雪深与气温关系分析　由图4和图5可知,积雪消融对于气温的响应存在一定的滞后效应,所以在分析雪深与气温相关关系时,应考虑超前时段气温对当前雪深的影响。气温从0:00开始上升,积雪从2:00开始下降,比气象变化滞后2 h左右(图5)。为了剔除突发的寒潮天气对气温和雪深的影响,本文选择主要融雪期全程(2月20日19:00—3月14日23:00)和快速融雪期(3月10日4:00—3月14日8:00)的雪深数据作为样本,并将滞后时间设置为7 h。计算该时期内雪深和同步气温的Pearson相关系数,以1 h作为步长逐一向前推进7 h,分别计算每个时次超前气温与雪深数据的相关系数,共得到16个相关系数(图6)。

由图6a可知,融雪期不同时次的气温与雪深均呈显著的负相关关系(样本数量在500个以上,0.001显著性水平临界值为0.146),说明融雪期之前7 h的气温对雪深有显著的影响,气温上升雪深减少,积雪融化,即便是夜晚气温的变化对雪深也有显著影响。在融雪期内,雪深与前3 h气温的相关关系最为显著,相关系数达到了-0.690,其次是同步气温,相关系数达-0.685,超前1 h和超前2 h的相关系数在-0.68左右。

从图6b可知,快速融雪期内不同时次的气温与雪深均呈负相关关系(样本数量为101个,0.001显著性水平临界值为0.321),相比主要融雪期,快速融雪期气温与雪深的相关系数更高,显著性更强,说明在快速融雪期,热量条件和融雪存在更深的联系,气温升高雪深下降的更显著。对比不同时次的气温和雪深的相关系数可知,超前1 h气温与雪深的相关系数最大,达-0.749,其次是超前2 h与同步气温,相关系数分别为-0.746和-0.743。

2.2.2　雪深与5 cm地温、雪面温度、地面温度、风速关系分析　在气温的基础上,研究了同步至超前5 h的5 cm地温、雪面温度、地面温度、风速在快速融雪期内与雪深的相关关系(图7)。由图7可知,不同时次气象因素与雪深的相关系数均为负,且通过了0.001显著性检验,说明在快速融雪期内,气温、5 cm地温、雪面温度、地面温度和风速的升高(增大)使雪深下降。对比5个气象因素,风速与雪深的相关系数最小,且超前时间越长,相关系数越小;同步5 cm地温与雪深的相关系数最大,为0.902,但超前时间越长,其相关系数越小。

综合所有超前时次的相关系数,雪面温度与雪深的相关性整体最高,除同步雪面温度外,雪面温度与雪深的相关性均高于其他气象因素,均值为

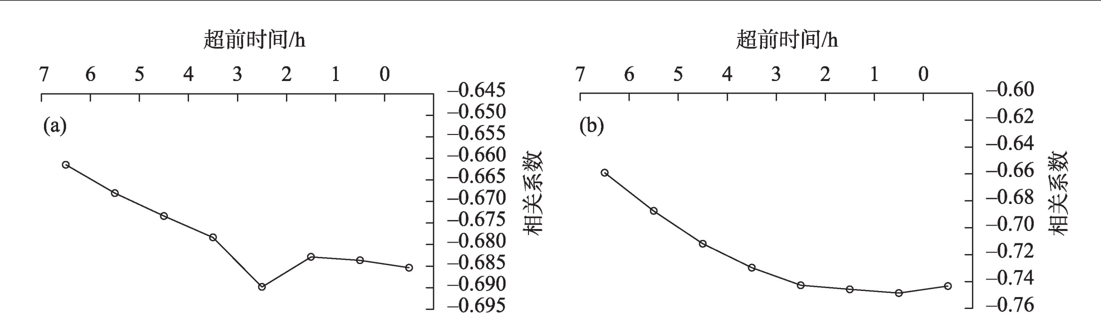


图6 2021年2月20日—3月14日主要融雪期(a)和2021年3月10—14日快速融雪期(b)逐小时雪深与同步和超前7 h气温相关系数

Fig. 6 Main snowmelt period from February 20 to March 14, 2021 (a) and the rapid snow melt period from March 10 to 14, 2021 (b) the correlation coefficient between hourly snow depth and simultaneous and advanced 7 hours temperature

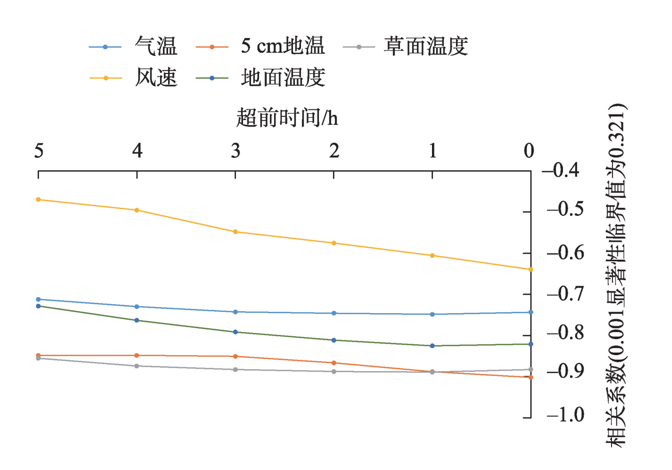


图7 2021年3月10—14日快速融雪期逐小时雪深与同步和超前7 h气象因素相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients between hourly snow depth and meteorological factors at the same time and 7 hours ahead of the rapid snowmelt period from March 10 to 14, 2021

0.878。超前1 h的雪面温度与雪深的相关系数最大,为0.889。在超前不同时次地面温度与雪深的相关系数中,超前1 h的地面温度与雪深相关系数最大,为0.825。风速与雪深呈显著的负相关关系,同步风速与雪深的相关性最强,为0.639,超前时间越长,相关系数越小。

2.3 融雪预测模型

2.3.1 气温-雪深关系模型 在快速融雪期超前1 h和同步气温与雪深有较显著的相关性(图7)。对气温与雪深的线性关系进行分析(图8)可得,雪深与气温总体呈一元线性关系,且超前1 h和同步气温与雪深的拟合关系较为相似,各项系数与R^2相差在0.01以内。气温对雪深影响较为明显的区间为-11~5 ℃,气温在0 ℃以上时,雪深与气温拟合趋势的斜率更大,说明气温升高对于融雪的作用更明显。

在同步气温和雪深关系模型(1)中,雪深的变化量和气温的变化量的比值为-0.4394 cm,即气温每升高1 ℃,积雪深度下降0.4394 cm。

$$y = -0.4394x + 13.438 \quad (1)$$

在超前1 h和雪深关系模型(2)中,雪深的变化量和气温的变化量的比值为-0.4482 cm,即气温每升高1 ℃,积雪深度下降0.4482 cm。

$$y = -0.4482x + 13.348 \quad (2)$$

超前1 h气温雪深模型的R^2高于同步气温-雪深模型,说明超前1 h气温-雪深模型的拟合效果较好。但当雪深在10 cm以下时(此时气温均达到0 ℃以上),雪深与气温的线性关系减弱,气温变化不大时,雪深仍有较大幅度减少。综合图8、图6b和图7可知,当雪深在10 cm以下时,积雪变薄,进入快速融雪期后期;积雪的快速消融可能并不是由气温作为主导,而是与雪本身的形态、日照辐射、风速、5 cm地温等综合因素共同影响。

2.3.2 多元逐步回归模型 气温、5 cm地温、雪面温度、地面温度、风速在快速融雪期内与雪深相关分析表明,单因子与雪深变化的相关性较强,但拟合方程对于雪深的解释力仅为0.56。因此,本文将快速融雪期内,与雪深变化相关性最强的不同时次的气象因子进行多元逐步回归分析,讨论同步5 cm地温、同步风速、超前1 h气温、超前1 h地温和超前1 h雪面温度对融雪的综合影响,以期获得更好地解释雪深变化的多元雪深模型。

以雪深(Snow_Depth)作为因变量,同步5 cm地温(Gst_5)、同步风速(Win_10)、超前1 h气温(Tem1)、超前1 h地温(Gst1)和超前1 h雪面温度

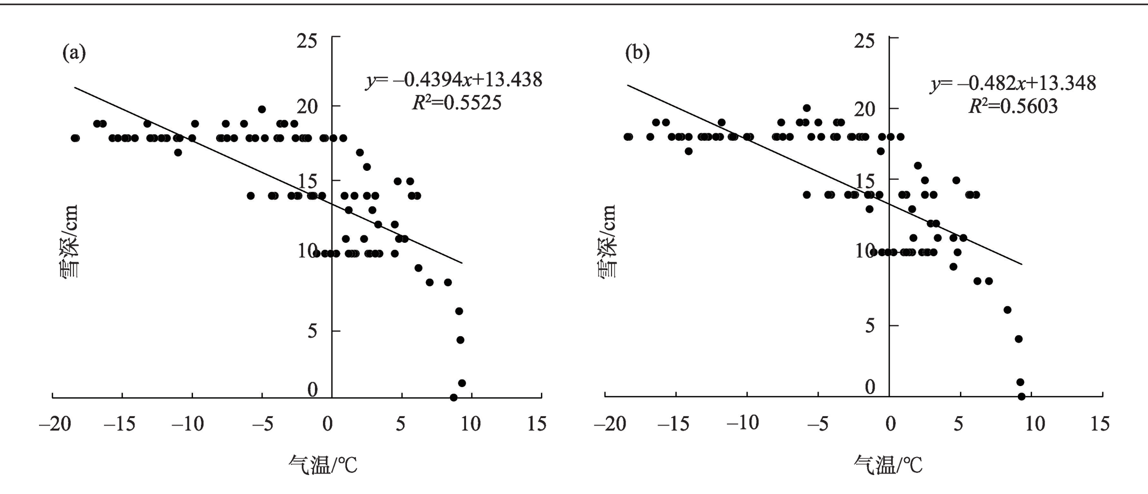


图8　2021年3月10—14日快速融雪期逐小时雪深与同步(a)和超前1 h(b)气温散点图

Fig. 8　Hour-by-hour snow depth and synchronization (a) and 1 hour ahead (b) temperature scatter plots during the rapid snowmelt period from March 10 to 14, 2021

(LGst1)建立关系模型：

$$Snow_Depth = 12.165 - 0.645Gst1 - 0.192Gst_5 - 0.397LGst1 + 0.303Win_10 - 0.145Tem1 \quad (3)$$

本文多元逐步回归的库克距离小于1，不存在强影响点；5步回归的显著性均小于0.001，模型具有统计学意义(表1)。快速融雪期影响雪深变化的5个气象因子均是重要因素，且偏相关系数均通过了0.05显著性水平检验；5个气象因子共同解释了超过90%的雪深变化，而同步5 cm地温，可以单独解释80%以上雪深变化，若作为单因子具有较高的解释度。

5个气象因素的偏相关分析中，同步5 cm地温的偏相关系数最大(-0.685)，超前1 h气温的偏相关系数最小(-0.313)，超前1 h地温的偏相关系数为正。与其相关系数对比可知，同步5 cm地温的相关和偏相关系数与其他气象因素相比均为最高，说明其与雪深变化的关系最密切；超前1 h地温与雪深的偏相关系数为正，相关系数为负，相关系数和偏相关系数符号相反，说明地温受雪深的影响比其他因素影响大。此外，同步风速与雪深的偏相关系数高于相关系数，在剔除其他条件影响下，风速与雪深的关系也较为密切，不可忽视。

3　讨　论

3.1　融雪过程中出现寒潮天气影响融雪日变化规律

张娟等[18]利用三江源腹地的玉树州隆宝自然保护区野外雪深自动观测站2013—2014年冬季每30 min积雪深度与同步气温数据，对发生在2月期间的积雪动态融雪过程及其与气温的关系进行了分析，在日变化分析中发现，该地区雪深下降主要发生在10:00—19:00，且雪深有2个快速下降阶段，

表1　快速融雪期气象因素对雪深多元线性逐步回归方程参数及偏相关系数检验

Tab. 1　Test of meteorological factors in the rapid snow melt period on the parameters and partial correlation coefficient of the multivariate linear stepwise regression equation of snow depth

时期	回归步数	变量	变量偏相关检验			回归方程参数		
			偏相关系数	P	R^2	调整R^2	F	P
快速融雪期	1	Gst_5	-0.685	<0.001	0.813	0.811	430.173	<0.001
	2	Win_10	-0.437	0.002	0.892	0.889	402.762	<0.001
	3	LGst1	-0.401	<0.001	0.9	0.896	289.616	<0.001
	4	Gst1	0.321	0.001	0.906	0.902	231.785	<0.001
	5	Tem1	-0.313	0.002	0.915	0.911	205.486	<0.001

分别出现在10:00—11:00与14:00—15:30;周扬等[19]对青藏高原玛多地区融雪过程研究发现,该地区冬季雪深下降主要发生在13:00—18:00。

然而额尔古纳站的积雪开始消融的时间为凌晨2:00,并且全天有约17 h的融雪时间;快速融雪时间段也是在凌晨,无法排除凌晨积雪密实化在雪深下降中起到的作用。

除了区域差异外,本研究分析了雪深变化量与气温的变化,在一天当中气温本应该上升的8:00—12:00,气温反而下降,可能与融雪期内额尔古纳频繁遭遇寒潮天气有关。在查阅气象预报信息后发现,2月21日和2月27日,内蒙古境内均发生多次大范围降雪寒潮天气,可能是导致该时段气温日变化异常的原因。

3.2 同步5 cm地温和1 h前的气温或对融雪影响较大

周扬等[20]在对融雪期雪深影响的其他气象要素的相关分析中表明,积雪消融过程中气温不是唯一影响要素,而是多种因素综合影响积雪消融。5 cm地温、雪面温度、地面温度和风速在快速融雪期与雪深变化的相关关系均通过了显著性检验,雪面温度与雪深变化的相关性最强,其次是5 cm地温,再次是地面温度和气温,风速与雪深变化的相关性最弱。在超前和同步的研究中,雪面温度与雪深的相关性始终保持较高的相关性,波动不大;地面温度与雪深的同步相关性要大于气温,并随着超前时序逐渐增加和气温相近,在超前5 h基本与气温相等;风速和雪深的相关性,随超前时间的减少而变大,在同步状态下相关系数接近0.65,因此风速对于雪深的作用基本是瞬时同步的。

值得注意的是,5 cm地温、雪面温度和地温与雪深的相关性强于气温,5 cm地温与雪深的相关性达到了0.9以上,可能是由于5 cm地温、雪面温度和地温的变化与气温的变化有关。

4 结 论

(1) 额尔古纳站融雪期(2020年2月20日—2021年3月14日),融雪速率呈先慢后快的趋势,缓慢融雪期融雪速率约为0.37 cm·d^{-1},快速融雪期融雪速率可达4.75 cm·d^{-1}。每日的2:00—19:00是雪深下降的主要时间段,凌晨雪深下降的速度比较快,最大融雪深度和次最大融雪深度均出现在凌晨,在日出至日落(7:00—18:00)雪深波动下降,且下降速度较为缓慢。

(2) 额尔古纳站雪深变化与气温、5 cm地温、雪面温度、地面温度和风速有显著的相关关系。整个融雪期和快速融雪期,气温的滞后效应产生不同的结果,在融雪期内,雪深与超前3 h气温的相关性最为显著,其次是当前气温;在快速融雪期,雪深的变化幅度主要取决于超前1 h的气温,其次是超前2 h和当前的气温。风速与雪深的相关系数最小,且不存在滞后性。同步5 cm地温与雪深的相关系数最大,超前时间与相关性呈反比。雪面温度与雪深的总体相关性最强。

(3) 气温与雪深之间存在线性关系。当积雪深度在10 cm以上,对雪深影响较为明显的气温区间为-11~5 ℃之间,且气温在0 ℃以上,雪深与气温拟合趋势的斜率更大,说明在气温达到0 ℃以上,气温升高对于雪深的减少作用更明显。在同步气温和雪深关系中,气温每升高1 ℃,积雪深度下降0.44 cm。在超前1 h和雪深关系中,气温每升高1 ℃,积雪深度下降0.45 cm,且超前1 h气温-雪深关系模型的拟合效果较好。当雪深在10 cm以下,积雪变薄,进入快速融雪期后期,积雪的快速消融可能并不是由温度作为主导。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] 刘昊, 宋海清, 李云鹏. 积雪深度再分析资料在内蒙古的适用性评价[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 641-646. [Liu Hao, Song Haiqing, Li Yunpeng. Applicability evaluation of snow depth reanalysis data in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(4): 641-646.]

[3] 陆智, 刘志辉, 闫彦. 新疆融雪洪水特征分析及防洪措施研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 256-258. [Lu Zhi, Liu Zhihui, Yan Yan. Features of snowmelt flood and control measures in Xinjiang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 256-258.]

[4] 周刚, 崔曼仪, 李哲, 等. 新疆春季融雪洪水危险性动态评价研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 950-960. [Zhou Gang, Cui Manyi, Li Zhe, et al. Dynamic evaluation of the risk of the spring snowmelt flood in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 950-960.]

[5] Armstrong R L, Brodzik M J. Recent northern hemisphere snow ex-

tent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(19): 3673-3676.

[6] DA Robinson, Dewey K F, Heim R R. Global snow cover monitoring: An update[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(9): 1689-1696.

[7] 杨林, 马秀枝, 李长生, 等. 积雪时空变化规律及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 96-102. [Yang Lin, Ma Xiuzhi, Li Changsheng, et al. Research progress in spatioal-temporal variation of snow cover and the influencing factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 96-102.]

[8] Liu X, Yanai M. Influence of Eurasian spring snow cover on Asian summer rainfall[J]. International Journal of Climatology, 2002, 22(9): 1075-1089.

[9] 施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2001. [Shi Yafeng. Glaciers and The Environment in China: Present, Past and Future[M]. Beijing: Science Press, 2001.]

[10] 萨楚拉, 刘桂香, 包刚, 等. 内蒙古积雪面积时空变化及其对气候响应[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 137-142. [Sa Chula, Liu Guixiang, Bao Gang, et al. The spatial and temporal changes of snow cover in Inner Mongolia and their responses to climate[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(2): 137-142.]

[11] 舒常禄. 内蒙古大兴安岭林区近40年积雪时空动态变化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. [Shu Changlu. Study on the Temporal and Spatial Dynamics of Snow Cover of Great Xing'an Mountains' Forest Region Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.]

[12] 李晨昊, 萨楚拉, 刘桂香, 等. 2000—2017年蒙古高原积雪时空变化及其对气候响应研究[J]. 中国草地学报, 2020, 234(2): 98-107. [Li Chenhao, Sa Chula, Liu Guixiang, et al. Spatiotemporal changes of snow cover and its response to climate changes in the Mongolian Plateau from 2000 to 2017[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 234(2): 98-107.]

[13] 孙晓瑞, 高永, 丁延龙, 等. 基于MODIS数据的2001—2016年内蒙古积雪分布及其变化趋势[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1):107-115. [Sun Xiaorui, Gao Yong, Ding Yanlong, et al. Distribution and trend of snow cover in Inner Mongolia from 2001 to 2016 based on MODIS data[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 107-115.]

[14] 柯丹, 汪玲玲, 牛生杰, 等. 基于常规气象资料融雪模式的建立及应用[J]. 大气科学学报, 2010, 33(5): 555-560. [Ke Dan, Wang Lingling, Niu Shengjie, et al. A Snowmelt model based on rountine meteoroligical data[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(5): 555-560.]

[15] 郭玲鹏, 李兰海, 徐俊荣, 等. 气温变化条件下融雪速率和土壤水分变化的同步观测试验[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 890-897. [Guo Lingpeng, Li Lanhai, Xu Junrong, et al. Experimental study on simultaneous observation of snowmelt and soil moisture content under air temperature increase[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 890-897.]

[16] 杨涛, 郭玲鹏, 黄法融, 等. 沙尘对天山积雪消融的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 122-129. [Yang Tao, Guo Lingpeng, Huang Farong, et al. Influence of dust on snowpack in the Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 122-129.]

[17] 彭亮, 郑淑文, 何英, 等. 基于MODIS的积雪时空变化与CMADS气象因子相关性研究——以塔什库尔干河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 53-62. [Peng Liang, Zheng Shuwen, He Ying, et al. Correlation between temporal and spatial changes of snow cover and CMADS meteorological factors based on MODIS: A case study of Tashkurgan River Basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(4): 53-62.]

[18] 张娟, 徐维新, 王力, 等. 三江源腹地玉树地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 936-945. [Zhang Juan, Xu Weixin, Wang Li, et al. Dynamic snow melting process and its relationship with air temperature in the hinterland of Sanjiangyuan Region in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(4): 936-945.]

[19] 周扬, 徐维新, 张娟, 等. 2013—2015年青藏高原玛多地区两次动态融雪过程及其与气温关系对比分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 101-113. [Zhou Yang, Xu Weixin, Zhang Juan, et al. A comparative analysis of the two dynamic snow-melting process and their relationship with air temperature during 2013-2015 in the area of Maduo, Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 101-113.]

[20] 周扬, 徐维新, 白爱娟, 等. 青藏高原沱沱河地区动态融雪过程及其与气温关系分析[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 24-32. [Zhou Yang, Xu Weixin, Bai Aijuan, et al. Dynamic snow-melting process and its relationship with air temperature in Tuotuohe, Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(1): 24-32.]

Analysis of the relationship between the dynamic snowmelt process of meadow grassland and meteorological factors: Ergun City

SANG Jing[1], WANG Yingbin[2], QIAN Lianhong[1], WANG Haimei[1], WANG Qiyu[3]

(1. Ecological and Agricultural Meteorological Center of Inner Mongolia, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 2. Liaoning Agricultural Technical College, Yingkou 15009, Liaoning, China; 3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract: The study of snow melt is of utmost importance in light of the increased global temperature and melting glaciers. The present study utilizes the ultrasonic snow depth measurement instrument, DSJ1, as well as meteorological observations from the same period, to analyze the snow melting process in Ergun from February-March, 2021. The results were as follows: (1) there is a sluggish snow melting period followed by a quick snow melting period in Ergun. During the slow snow melting season, the pace of snow melting on average was 0.37 $cm \cdot d^{-1}$ and could reach 4.75 $cm \cdot d^{-1}$ during the fast snow melting period. Every day between 2:00 and 19:00, the snow depth decreased at its lowest point. (2) As the temperature rose by 1 ℃, the snow depth decreased by 0.439 cm. When the snow depth was greater than 10 cm, the temperature range from −11 ℃ to 5 ℃ had a significant impact on snow depth, and the slope of the fitting trend between snow depth and temperature was greater when the temperature was above zero. (3) The temperature lag effect varied during the main and rapid snowmelt periods. The correlation between the current temperature and snow depth was the most significant factor during the rapid melting period. During the snow melt period, the change in snow depth depended primarily on the current temperature one hour ahead, followed by the temperature two hours ahead. Wind speed and direction were also critical factors. The correlation coefficient for snow depth was the lowest, and no hysteresis was evident. (4) The 5 cm ground temperature had the greatest influence on the variation in snow depth during the snow melt period in addition to the cumulative effect of multiple meteorological factors. Analysis of the law of snow melt in this paper will be followed by an in-depth analysis of the temperature change during snow melt, as well as the correlation between various meteorological factors and snow melt.

Keywords: meadow grassland; dynamic snowmelt; meteorological factors